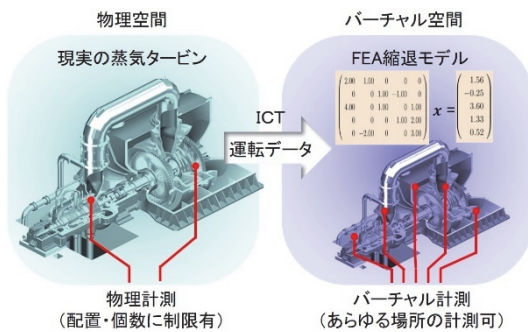


回転機械のフレキシブルな運用を支援する バーチャル計測技術

Virtual Monitoring to Support Flexible Operation of Steam Turbines



伊藤 寛志*¹
Hiroshi Ito

細見 昌一郎*²
Shoichiro Hosomi

手塚 宣和*³
Norikazu Tezuka

石田 智広*⁴
Tomohiro Ishida

有限要素解析 (FEA: Finite Element Analysis) モデルの数理的縮退により、高速高精度な数値予測を可能にするモデルオーダーリダクション (MOR: Model Order Reduction) 技術を活用し、回転機械の熱変形を予測するバーチャル計測技術の開発に取り組んでいる。本報では、バーチャル計測を実機に適用し、蒸気タービンのラジアルクリアランスを FEA に準じた精度にてリアルタイム予測できたことを報告する。本技術は、クリアランス管理の高度化による性能・安全性向上に有用であり、これにより火力発電のフレキシビリティ改善への貢献が期待される。

1. はじめに

火力発電には、電力供給としての役割に加えて、変動性再生可能エネルギーの出力変動をカバーし、電力需給バランスを調整する役割も期待されるようになった。そのため、発電用の回転機械 (蒸気タービン・ガスタービン) には、出力変化率の向上や起動時間短縮といったフレキシビリティ改善が求められている。しかし、出力 (作動ガス流量) 変化は、図1に示すように、ロータと静止部 (外車・内車・翼環等) の熱変形に影響するため、接触リスクが高まる問題がある。そのため、ロータと静止部間の間隙のモニタリングによるクリアランス管理の高度化が、性能・安全性向上において一層重要になる。しかし、物理センサには、配置・個数に制限があり、高リスク部を全てモニタリングすることはできない。そこで当社では、蒸気タービンのロータと静止部間のラジアル方向の間隙 (ラジアルクリアランス) を対象として、容易に実測できる状態量 (作動ガスの圧力や温度) から、数値予測モデルを用いて、この間隙を推定するバーチャル計測技術の開発に取り組んでいる。本開発では、この数値予測モデルとして、伝熱・構造 FEA モデルを MOR により低次元化した縮退モデルを用いることで、FEA に準じた精度にてラジアルクリアランスをリアルタイムに予測可能なバーチャル計測を実現することを目的とした。

*1 三菱重工業株式会社総合研究所強度・構造研究部 主席研究員

*2 三菱パワー株式会社デジタルイノベーション総括部IT戦略企画部 主席チーム統括

*3 三菱パワー株式会社ターボマシナリー本部ST技術総括部蒸気タービン計画部 主席チーム統括 技術士 (機械部門)

*4 三菱重工業株式会社総合研究所強度・構造研究部

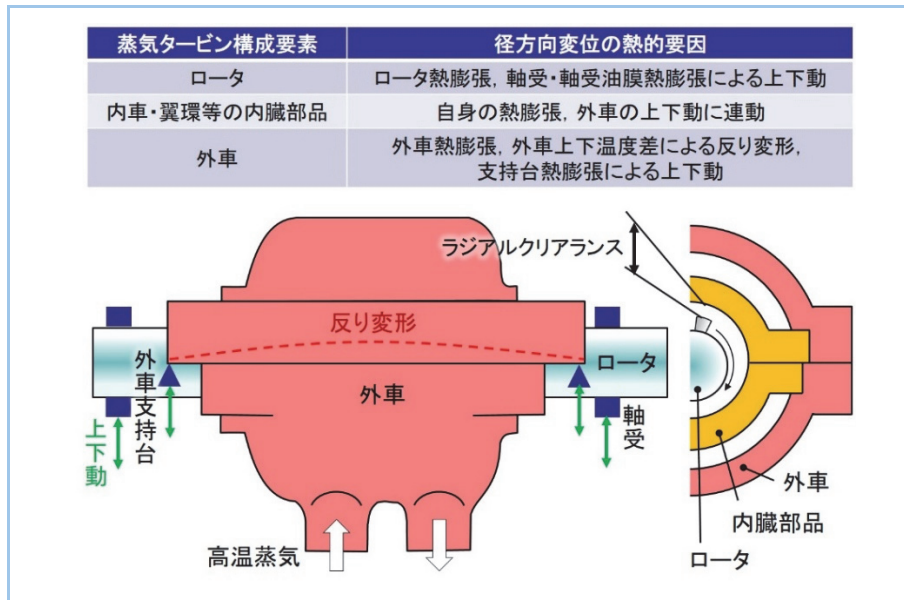


図1 蒸気タービンの概略構造

ラジアルクリアランスが変動する熱的要因を図示する。

2. 伝熱構造縮退モデルの構築

設計開発段階の健全性評価において、ラジアルクリアランスは次の手順(図2a)で評価される。

- ① 運転条件(蒸気タービン出入口の蒸気温度・圧力等)から FEA の計算条件(壁面の熱伝達率・蒸気温度・圧力、ロータ遠心力等)を作成する。
- ② 伝熱 FEA により、蒸気タービン・メタル部の非定常温度分布を計算する。この結果を構造 FEA モデルの熱負荷として与え、蒸気タービン全体の変形を求める。
- ③ 初期ラジアルクリアランス値に対して、ロータと静止部の径方向の変位、及び、別途算出した翼、軸受、外車支持部の変位を足し引きし、評価時刻のラジアルクリアランスを算出する。

以上の FEA による評価では、緻密なモデリングにより精度の良い結果が得られる。反面、1ケースの計算に1日以上時間を要するため、本評価手順を、リアルタイム性が要求されるバーチャル計測に適用することはできない。そこで、MOR により構築した縮退モデルで FEA を代替することで本評価手順をリアルタイム化し、バーチャル計測を実現する(図2b)。

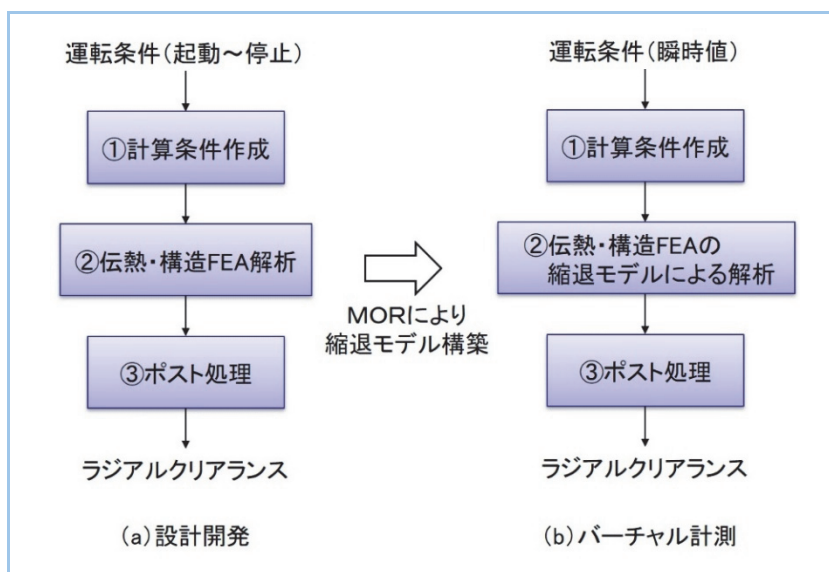


図2 ラジアルクリアランス評価方法

設計開発における FEA を用いたラジアルクリアランスの評価手順と、バーチャル計測における変更点を図示する。

構造 FEA の場合について、直交固有分解 (POD: Proper Orthogonal Decomposition) – ガラーキン射影を用いた MOR^{(1)~(6)} の手続きを説明する。ガラーキン射影とは、支配方程式 (変位を未知変数とする力の釣合い式) の定義域を定める状態空間を、その部分空間に制限し、低次元の問題に変換する数学的手法である。この状態空間は、未知変数の数を M とすると、 M 次元実数ベクトルで表現される。また、部分空間としては、実際に取り得る解の集合を内包するような部分空間が選ばれる。具体的には、図3に示すように、事前に様々な計算条件の FEA を実施し、解集合 (の近似) を求めておく。次に、これらの解を列に並べたスナップショット行列に対して N 次の打ち切り特異値分解を適用し、得られた左特異ベクトルを列に並べた $M \times N$ 行列 U を求める。この行列 U は、 N 次元の部分空間への射影行列ともなっており、これにより所望の部分空間が得られる。ここで、解集合を部分空間に内包させるには N をある程度大きくする必要があるが、それでも通常、 $N \ll M$ となる。

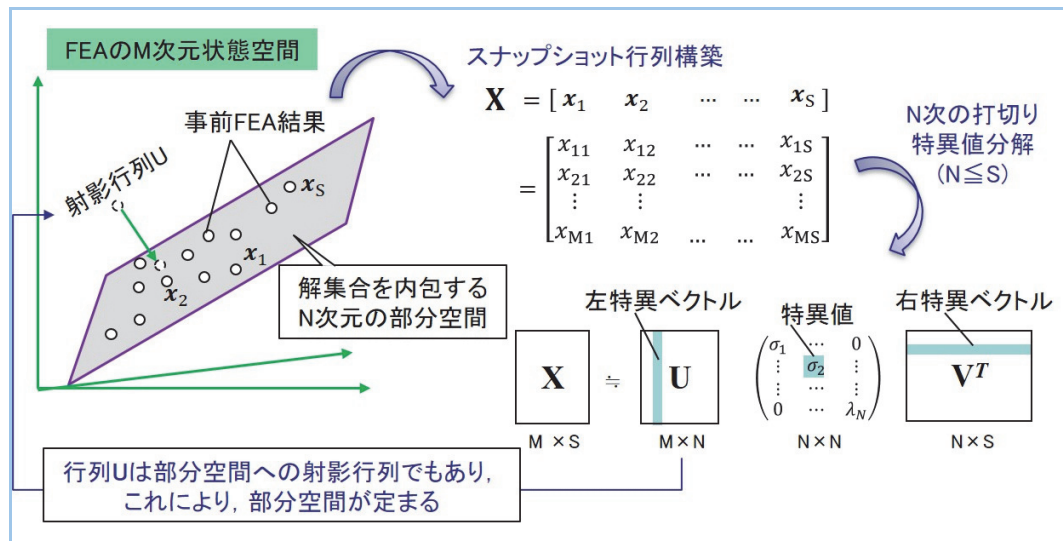


図3 POD-ガラーキン射影における部分空間の定義

次元低減に用いる部分空間を、事前 FEA 結果と特異値分解を使って求める方法を図示する。

射影行列 U が求まると、図4に示すガラーキン射影により、支配方程式を縮退モデル (未知変数の数が N の連立一次方程式) に変換できる。ここで、経験的には、 N は 100 程度の数であれば十分であり、この場合、縮退モデルを使うと、元の支配方程式よりも 1 万倍程度早く解を得ることができる。また、射影行列 U を用いて、縮退モデル解から元の変数を復元することもできる。

以上では線形性を仮定して MOR の手続きを説明した。たが、実際の熱変形現象には物性値の温度依存性や、輻射 (伝熱問題) といった非線形現象が含まれる。本開発では、これら非線形性に対する縮退手法も適用し、縮退モデルの精度向上を図っている。

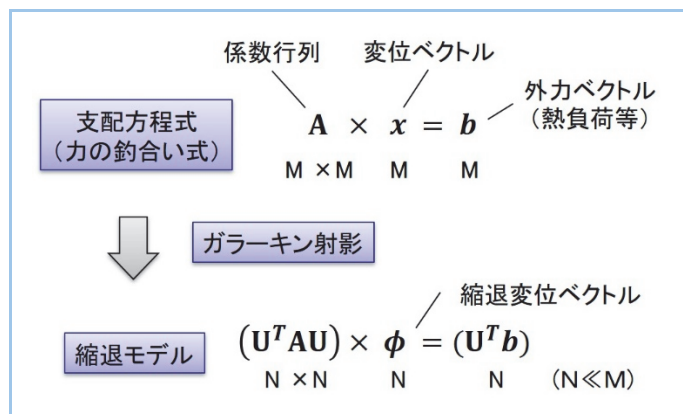


図4 POD-ガラーキン射影による縮退モデルの導出

射影行列 U を用いて、力の釣合い式を低次元部分空間上のモデルに縮退する方法を図示する。

3. バーチャル計測システムの仕組み

バーチャル計測の使用方法としては、物理計測と同様に、発電所内の監視画面に結果を表示してモニタリングと運転制御に用いる、あるいは、TOMONITM (三菱パワー株式会社・デジタルソリューションの商標)を用いた遠隔モニタリングに用いるといったケースが考えられる。本開発では、前者の使用方法の検証のため、実証設備複合サイクル発電所(第二T地点)の特殊計測室内に図5に示されるバーチャル計測システムを構築した。

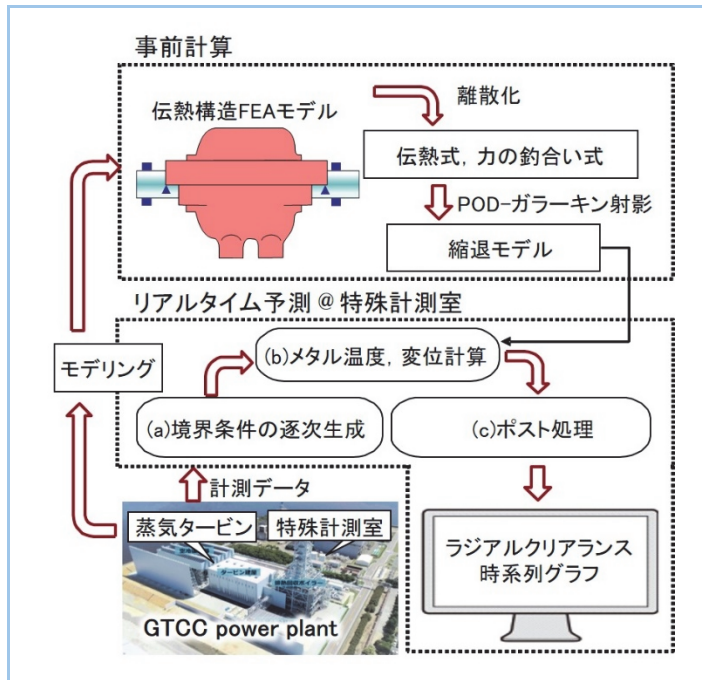


図5 バーチャル計測システムの概要

第二T地点の特殊計測室に設置したバーチャル計測システムの概略構成を図示する。

3.1 システム構成とリアルタイム計算方法

本システムは、FEAの前章の評価手順①②③に対応した主要モジュール(a)(b)(c)から構成される。すなわち、(a)計測ファイルから運転条件を読み込み、FEAの計算条件を作成する計算条件作成モジュール。(b)伝熱と構造の縮退モデルにより、蒸気タービンの温度と変位を計算する、温度・変位計算モジュール、(c)計算結果を手順③と同様に処理し、ラジアルクリアランスを求めるポスト処理モジュール、からなる。本システムにおいては、計測ファイルが更新されたら、モジュール(a)(b)を順次実行し、温度と変位の状態量を最新時刻値に更新し、次に、モジュール(c)を実行して得たクリアランス結果をモニターに出力する。これが、1サイクルのバーチャル計測の処理になる。ここで、計測ファイルの更新間隔は1秒であり、1サイクルの処理が1秒以上要した場合は、その間の計測ファイルはスキップするようにした。したがって、バーチャル計測値の出力間隔は1秒の倍数になる。

3.2 縮退モデル学習方法

縮退モデルの学習データには、実際の運転を反映した事前 FEA 結果(スナップショット)を用いるのが望ましいと考えられる。そこで、起動時入口メタル温度で規定されるコールド・ウォーム・ホットの各起動モードにおける運転データをもとに、モジュール(b)で計算条件を作成して FEA を実施した。これにより得られたスナップショットを用い、未知変数の数が共に 80 の伝熱と構造の縮退モデルを構築した。

4. バーチャル計測結果

第二T地点にて、バーチャル計測のリアルタイム性と FEA に対する予測精度を検証した。

4.1 リアルタイム性の検証結果

図6は、バーチャル計測の回数を、バーチャル計測1サイクルの処理時間毎に集計した結果である。本結果から、1サイクルの処理時間が、1秒と2秒のケースが全体の97%（稼働時間換算では94%）となり、計測値に対して2秒程度の遅れでバーチャル計測結果が得られることが分かる。ラジアルクリアランスの2秒間の変化は僅かであり十分な時間分解能であることから、リアルタイムでのバーチャル計測が実現できていることを確認した。

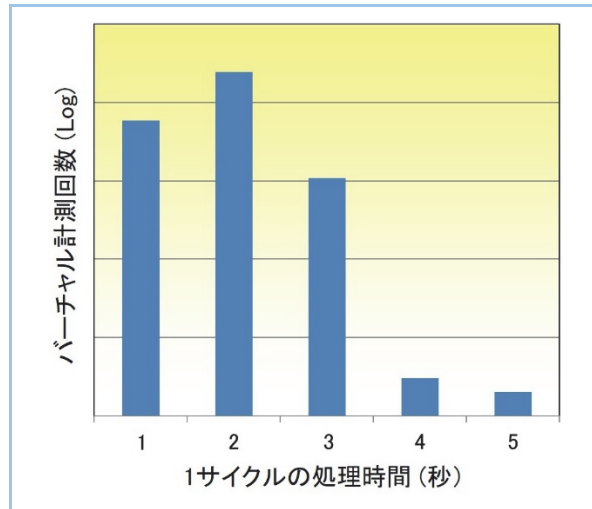


図6 バーチャル計測の速度計測結果

バーチャル計測回数を、バーチャル計測1サイクルの処理に要する時間ごとに集計し図示した。1秒と2秒が全体の97%（稼働時間換算では94%）を占める。

4.2 FEA に対する予測精度の検証結果

第二T地点の高圧蒸気タービンで、事前学習していないコールド起動を対象に、図7aに示した概略位置におけるラジアルクリアランスのバーチャル計測を実施した。バーチャル計測結果と、縮退モデルを FEA に差し替えた場合の結果との差を、初期クリアランスの代表値で無次元化して図7bに示している。本結果から、FEA との差は10%未満であり、縮退モデルが FEA を良く近似していることを確認した。なお、両者の差が大きくなる起動直後のスナップショットを多く学習データに加えることで、更に差を小さくする余地がある。

以上により、FEA に準じた精度にてラジアルクリアランスをリアルタイム予測できることを明らかにした。

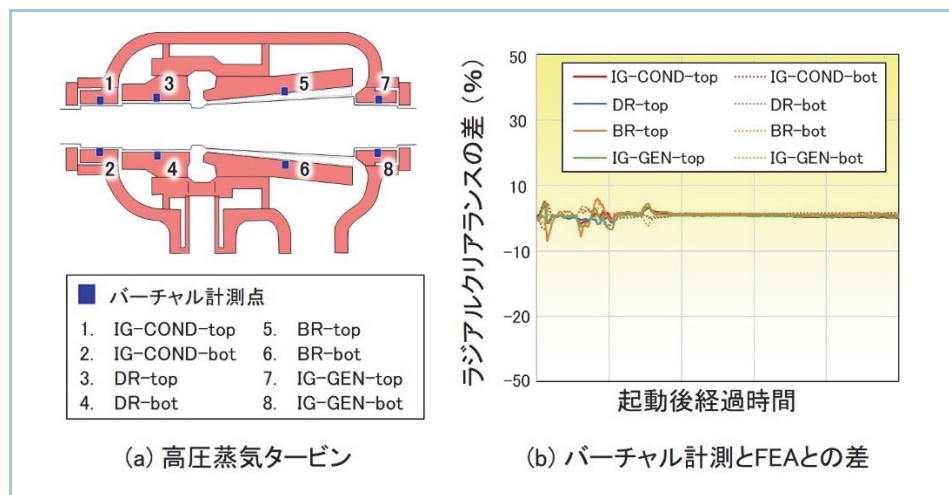


図7 ラジアルクリアランスのバーチャル計測結果

左図に概略位置を示したロータと内臓部品間のラジアルクリアランス予測結果を右図に示す。右図では、バーチャル計測値と FEA 予測値との差を初期クリアランス値で無次元化して示している。FEA との差は10%未満である。

5. まとめ

蒸気タービン・フレキシブル運転の安全な実施を支援するため、POD－ガラーキン射影に基づいたMORによる伝熱構造縮退モデルを用いた、ラジアルクリアランスのバーチャル計測技術を開発した。第二T地点・高圧蒸気タービンのバーチャル計測を実施し、FEA に準じた精度にてラジアルクリアランスをリアルタイムに予測できることを明らかにした。本技術は出力変化率の向上や起動時間短縮といったフレキシビリティ改善に貢献でき、蒸気タービン・ガスタービンの他、回転機械の熱変形問題に適用可能である。

今後の展開として、バーチャル計測を運転制御に用いるには、実際の値に対する予測精度の向上が重要になることから、熱変形モデリングの高度化による予測誤差低減に取り組んでいく。また、フレキシブル運転では、ロータ応力の増加によりロータが短寿命化しやすいため、効率よくロータを点検、交換するには従来よりも厳密なロータ余寿命管理が必要になる。そのため、ロータ応力・疲労のバーチャル計測技術の開発にも取り組んでいく。

参考文献

- (1) Rewienski, M., White, J., Model order reduction for nonlinear dynamical systems based on trajectory piecewise-linear approximations, Linear algebra and its applications, Vol. 415 Issue 2-3 2006, pp. 426-454.
- (2) Chaturantabut, S., Sorensen, D. C. Nonlinear model reduction via discrete empirical interpolation, SIAM J. Sci. Comput, Vol. 32 Issue 5 2010, pp. 2737-2764.
- (3) Hochman, A., Bond, B. N., et.al, A stabilized discrete empirical interpolation method for model reduction of electrical, thermal, and microelectronmechanical systems, DAC '11 Proceedings of the 48th Design Automation Conference 2011, pp. 540-545.
- (4) Qian, J., Wang, Y. et al., Projection-Based Reduced-Order Modeling for Spacecraft Thermal Analysis, J. Spacecraft Rockets, Vol. 52 Issue 3 (2015), pp. 978-989.
- (5) Biyik, E., D'Amato, F. J. et al., A Reduced Order Modeling Methodology for Steam Turbine Clearance Design, J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 139 Issue 9 (2017), 9 pages.
- (6) Hiroshi, I., Identification of metal temperature distribution in steam turbine during start-up operation using particle filter and model order reduction, ASME Turbo Expo. Arizona, USA, GT2019-90727.